

激光参畝研究实验

南京科技协会激光组 石秉仁

五机部激光专业情报网
南京市科技协会

一九七九年十二月

引 言

激光参量是表征激光腔内规律性的物理量。深入研究和认识激光参量的物理意义，了解激光参量对激光腔总体性能的影响，掌握激光参量的影响因素及其在激光腔运转过程中的变化趋势，建立研究激光参量的实验原理和方法，这是我们深入研究激光基本理论，正确认识激光过程的机制，探索新型激光腔，设计激光腔和选择激光腔运转条件所必须的研究方法和手段。同时，激光参量数据又是全面衡量激光腔性能，将激光技术应用到工农业、国防、科研等方面去的重要科学依据。譬如仅就激光输出能量这一参量而言，不同类型的激光腔输出能量差异悬殊。这种差异是由它们各自的内在本质如与激光振荡有关的能级特性、光谱与增益特性以及其它激光性质的不同等等矛盾的特殊性所决定。即使同种工作物质的激光腔也会因激光腔结构的不同，运转条件的不同，或工作物质内在性质的某些差异，输出能量相差也较大。因此，激光输出能量这一参量就与激光过程的内在规律性密切相关。又如，作为令人向往的激光辐射武器的应用中要解决的最关键问题之一就是激光束的亮度。那么，激光输出能量和方向性就成为权衡某种激光腔能否实现这一目的的最重要的依据。可见激光参量的研究和实验测定，对于发展激光基本理论的研究和激光应用的研究有着十分重要的作用。

激光参量种种，一般分为三大类。一类是激光腔输出光束性质的参量，如光束结构参量、能量、功率、模式结构、方向性、脉冲宽度、波长、频宽等；一类是反映激光腔内部作用

过程的参敏，如增益特性、损耗、热畸变、弥散等；一类是激光工作物质的性质参敏，如热光参敏、静态光吸收参敏、散射参敏及非线性折射率参敏等。

要通过大量的理论和实验研究来深刻认识激光参敏的物理意义，阐明激光参敏的影响因素和变化规律，以及各激光参敏对激光回总体性能的影响及其相互间的制约情况，并建立相应的新的实验研究的原理、方法和手段。鉴于篇幅所限，这里仅介绍激光束结构参敏，输出场图，输出能量与功率，效率，激光脉冲宽度与振荡波形，方向性，热透镜效应和热破坏，增益特性及损耗，激光中心波长和谱线宽度，激光回最佳运转条件与激光参敏间匹配等方面的实验研究的方法和结果。

应当指出，激光参敏的实验测定条件是非常重要的。即使是同一台激光回，由于实验条件的不同，其激光参敏数据会有较大的差异。因此，在研究和比较激光回的有关激光参敏时，务必要注意它们的实验条件。

目 录



引言

第一章 激光束的结构 1

- 一、 激光束的结构参数 1
- 二、 激光束的结构参数的变换 7
- 三、 激光束结构参数的测定实验 9

第二章 激光输出场图 18

- 一、 近场图和远场图 18
- 二、 输出场图的研究和应用 19

第三章 激光输出能易 27

- 一、 激光口输出能易的理论公式 27
- 二、 激光口输出能易的影响因素 29
- 三、 激光输出能易与激光口总体性能关系 37
- 四、 激光输出能易的测定实验 38

第四章 激光输出功率 66

一、	激光输出功率的定义	66
二、	激光输出功率的影响因素	67
三、	激光输出功率的测定实验	72
第五章 激光脉冲宽度及振荡波形		88
一、	激光脉冲宽度和振荡波形	80
二、	激光脉冲宽度的测定实验	81
三、	激光振荡波形的观测	87
第六章 激光回输出效率		92
一、	能量(或功率)转换效率与斜率效率	92
二、	激光回输出效率的测定和计算	94
第七章 激光束的方向性		97
一、	激光束的发散角和强度空间分布特征	97
二、	激光束方向性的测定实验	100
第八章 激光回热透镜效应和热破坏		111
一、	激光回热透镜效应	111
二、	热透镜效应参数的测定实验	115
三、	含有类透镜介质的激光谐振腔的等效	118
四、	热透镜效应的补偿	121
五、	激光回的热破坏	127

第九章 激光振荡波长及谱线宽度 131

- 一、 光谱的一般概念 131
- 二、 激光振荡光束的频率特性 133
- 三、 激光中心波长和谱线宽度的测定实验 136

第十章 激光器的增益 142

- 一、 激光器的增益特性 142
- 二、 增益系数的测定实验 152

第十一章 激光器的光损耗 161

- 一、 激光工作物质的光吸收 162
- 二、 激光器窗口材料的红外区域光吸收 163
- 三、 光吸收系数的测定实验 169
- 四、 气体激光器损耗的测定实验 184

第十二章 激光器最佳运转条件与激光参数间的

匹配 188

- 一、 研究激光器最佳运转条件及激光参数间匹配的意义 188
- 二、 最佳运转条件的实验选择方法 192

第一章 激光束的结构

一、激光束的结构参数

激光束横截面上电场分佈情况可用厄米高斯函数来描述：

$$f(x) = H_m \left[x \left(\frac{2\pi}{d\lambda} \right)^{1/2} \right] \exp \left(-\pi \frac{x^2}{d\lambda} \right)$$

----- (1-1)

其纵向分佈为双曲线型，轮廓如图1。

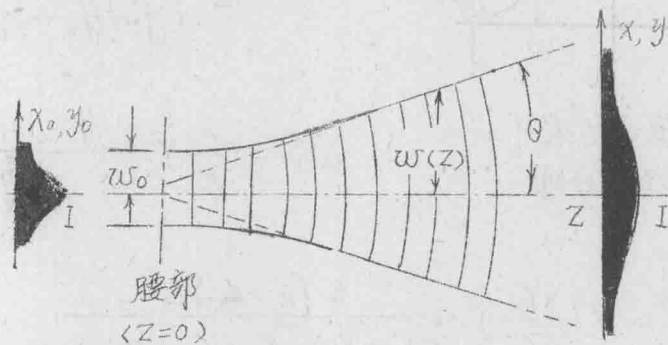


图1 激光束外形及x、y截面上激光束强度分佈

z 轴代表激光束轴。 m 代表激光束横截面上沿 x 方向的节数数目，沿 y 方向的分佈与 x 方向上相类似，其节数数目为 n 。当 $m=0$ ， $n=0$ 时厄米函数所代表的是基模，这种分佈的光束叫高斯光束。 w_0 为最小光斑半径，以 w_0 处为原点，沿 z 轴光束直径 w 是变化的并为 z 的函数，光束的等相位面曲率

半径 R 也是 z 的函数。 ω_0 , ω , z , R 及发散角 θ 是激光束的主要结构参数。 $\omega(z)$, $R(z)$ 与 z 的函数关系为:

$$\omega(z)^2 = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad \text{--- (1-2)}$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad \text{--- (1-3)}$$

定义强度下降到中心强度 I_0 的 $1/e^2$ 的地方为光束边界, 其线度 2ω 即作为光斑直径。(图2)。

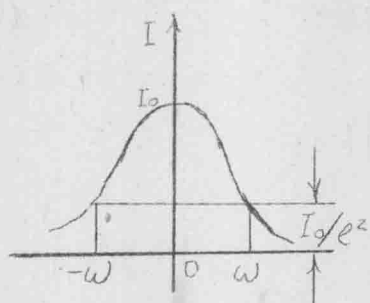


图2. 光强沿光束半径方向的分布

激光束结构参数主要取决于谐振腔的结构。由谐振腔的结构参数用下述诸公式可以计算激光束的结构参数:

$$\frac{b}{z} = L^2 \frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2} \quad \text{--- (1-4)}$$

$$\omega_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 \frac{L (Y_1 - L) (Y_2 - L) (Y_1 + Y_2 - L)}{(Y_1^2 + Y_2^2 - 2L)^2} \quad \text{--- (1-5)}$$

$$\begin{aligned} \omega_1^4 &= \left(\frac{\lambda Y_1}{\pi} \right)^2 \frac{(Y_2 - L) L}{(Y_1 - L) (Y_1 + Y_2 - 2L)} \\ &= \left(\frac{L \lambda}{\pi} \right)^2 \frac{g_2}{g_1 (1 - g_1 g_2)} \quad \text{--- (1-6)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_2^4 &= \left(\frac{\lambda Y_2}{\pi} \right)^2 \frac{(Y_1 - L) L}{(Y_2 - L) (Y_1 + Y_2 - 2L)} \\ &= \left(\frac{L \lambda}{\pi} \right)^2 \frac{g_1}{g_2 (1 - g_1 g_2)} \quad \text{--- (1-7)} \end{aligned}$$

$$t_1 = \frac{L (Y_2 - L)}{(Y_1 + Y_2 - 2L)} \quad \text{--- (1-8)}$$

$$t_2 = \frac{L(r_1 - L)}{r_1 + r_2 - 2L} \quad \text{--- (1-9)}$$

式中诸符号意义见图3。

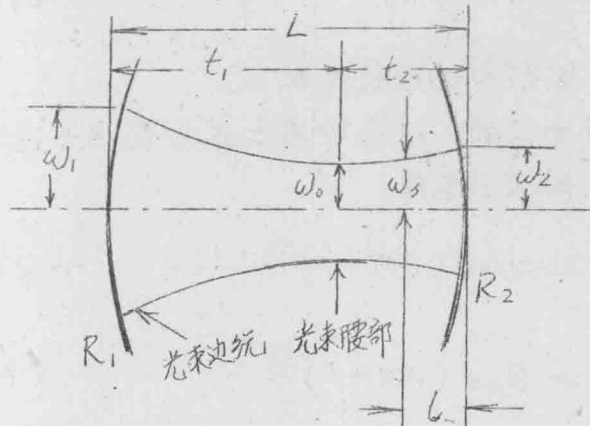


图3. 不同反射镜曲率的谐振腔的有关参量

其中：

$$\begin{cases} g_1 = 1 - \frac{r_1}{L} \\ g_2 = 1 - \frac{r_2}{L} \end{cases} \quad \text{--- (1-10)}$$

b 为共焦参量, $b/2 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$; λ 为波长; w_1, w_2 为反射镜上的光斑半径。

并有：

$$w_3^2 = w_2^2 \left[\left(1 - \frac{L}{r_2} \right)^2 + \left(\frac{L\lambda}{\pi w_2^2} \right)^2 \right] \quad \text{--- (1-11)}$$

光束远场发散角 θ 为：

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad \text{--- (1-12)}$$

腔内模式体积 V_0 腔为：

$$V_{0\text{腔}} = \frac{\pi L}{2} (\omega_1^2 + \omega_2^2) \text{ --- (1-13)}$$

$$\text{又, } V_{00} \approx \omega_0^2 \pi b = \frac{\lambda b^2}{2} \text{ --- (1-14)}$$

式中 V_{00} 为等效共振腔内的基模体积。

以上是指基模而言的，对高阶模上述公式仍然适用，只是高阶模与基模的光斑大小不同：

$$\omega^{(m)} = \omega_{00} (2m+1)^{1/2} \text{ --- (1-15)}$$

$$\theta^{(m)} = \theta_{00} (2m+1)^{1/2} \text{ --- (1-16)}$$

式中 $\omega^{(m)}$ 、 $\theta^{(m)}$ 分别为 m 阶模的光束半径及发散角。

ω_{00} 、 θ_{00} 分别为基模的光束半径及发散角。 m 为模的阶次。

下面列举不同类型谐振腔光学系统的光束结构参数，见表 1。

表 1. 光学系统与激光束结构参数

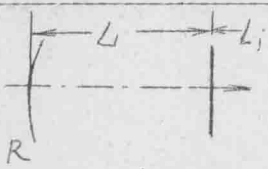
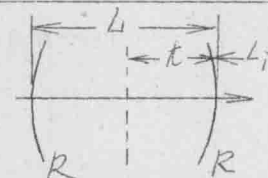
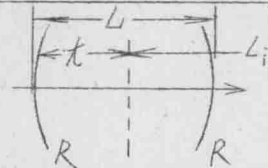
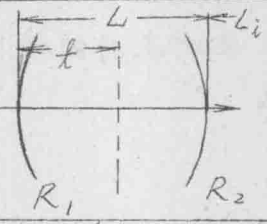
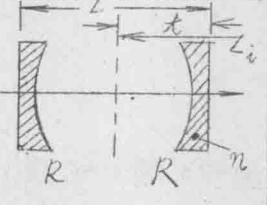
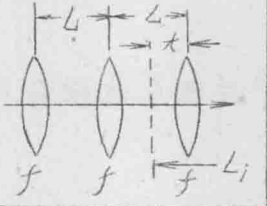
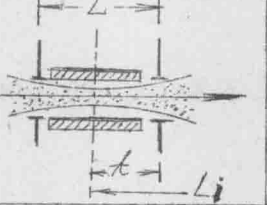
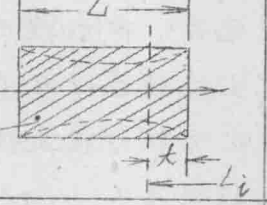
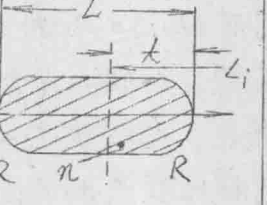
光学系统	$\frac{b}{2} = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$	π	备注
	$\sqrt{L(R-L)}$	$\pi=0$ 光腰位于平面反射镜上	
	$\frac{1}{2}R = \frac{1}{2}L$	$\frac{1}{2}R = \frac{1}{2}L$	$R=L$
	$\frac{1}{2}\sqrt{L(2R-L)}$	$\frac{1}{2}L$	

表1 (续)

光学系统	$\frac{b}{2} = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$	t	备 注
	$\frac{\sqrt{L(R_1-L)(R_2-L)(R_1+R_2-L)}}{R_1+R_2-2L}$	$\frac{L(R_1-L)}{R_1+R_2-2L}$	
	$\frac{R\sqrt{L(R-L)}}{2R+L(n^2-1)}$	$\frac{nLR}{2R+L(n^2-1)}$	一个反射面淀积在折射率为n的平凹镜上
	$\frac{1}{2}\sqrt{L(4f-L)}$	$\frac{1}{2}L$	
	$\frac{1}{2}L$	$\frac{1}{2}L$	由相距L的两个相等孔径的光圈构成
	$\frac{L}{2n}$	$\frac{L}{2n}$	
	$\frac{nR\sqrt{L(2R-L)}}{2n^2R-L(n^2-1)}$	$\frac{LR}{2n^2R-L(n^2-1)}$	是折射率为n的球壳共振腔或是有弯曲的光学材料,假定光束通过两端时的波前与端面相交重合

除了上述激光束主要结构参数随的变化规律外，激光束的准直距离、激光束的中心强度、激光束横截面内电场强度的位相以及高斯球与波前上的轴上点的附加位相差也都是 Z 及 ω_0 的函数。令光束直径由 $\omega_0 \Rightarrow \sqrt{2}\omega_0$ 为准直范围，此时波前仍接近于平面波前，准直范围（瑞利范围） Z_R 为：

$$Z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$$

激光束中心强度 I_0 是 Z 和 ω_0 的函数，有：

$$I_0 = I_{\text{腰}} \cdot \frac{\left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2}{Z^2 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}\right)^2} \quad (I_{\text{腰}} \text{ 为光腰处光强})$$

光束横截面内的电场强度 E 与中心点处产生 $\frac{\pi}{2}$ 位相差的距离 r 为：

$$r_{\pi/2} = \sqrt{\frac{\pi^2 \omega_0^2}{2\lambda Z}} \omega(Z)$$

高斯球与波前上的轴上点的附加位相差 φ 亦是 Z 和 ω_0 的函数：

$$\tan \varphi = \frac{\lambda Z}{\pi \omega_0^2}$$

激光束结构参数直接表征了激光束的质量优劣，例如模式情况、准直性、方向性的优劣，并且还是激光运转条件合适与否的重要依据。就激光束质量而言， ω_0 大则方向性和准直性好，输出功率大；光强 ΔI_0 的变化缓慢，附加位相差小， $r_{\pi/2}$ 的距离大。就决定激光运转条件而言，可利用 ω_0 的大小来实施棒自孔径化选模；光腰位于腔内的利于腔内倍频，光腰位于腔外的利于腔外倍频，并且倍频晶体应置于光腰处；光腰位于反射镜上的则当防刮与被激光损伤；腔内的光腰位置是腔内选模光栅位置等等。

应当指出，当激光腔处于较高泵浦能率上运转时，由于热畸变效应，谐振腔的结构参数就发生了变化，导致理论计算出的光束结构参数与实际的光束结构参数差异很大。实验研究中往往根据需要来具体测定实际的光束结构参数。

二、激光束结构参数的变换

激光技术中常常需要将激光腔输出光束的结构参数予以适当变换，以满足对光束结构参数的要求。

根据付里叶变换原理，高斯光束经付里叶变换后仍具有高斯分布特征。这种变换可用一个透镜来完成(图4)。这种变

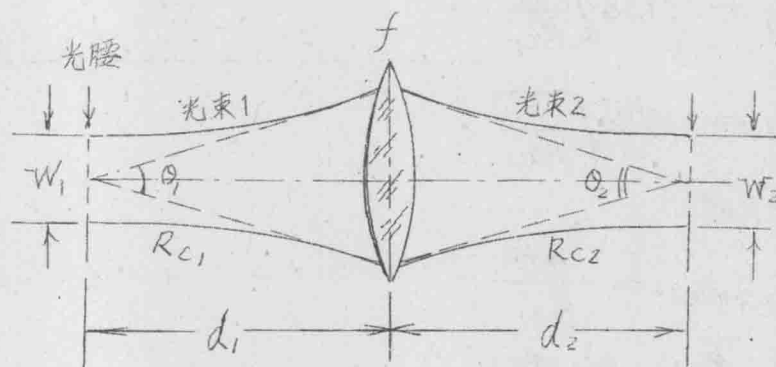


图4 高斯光束的透镜变换

换常称作光束的高斯变换。设光束1的共焦参数为 R_{c1} (即 b_1)，光束2的共焦参数为 R_{c2} ，变换用透镜的焦距为 f ，光束1光腰和光束2光腰距透镜的距离分别为 d_1 和 d_2 ，则变换前后两光束的结构参数有如下关系：

$$\begin{cases} \frac{R_{c2}}{f} = \frac{R_{c1}/f}{(1 - \frac{d_1}{f})^2 + (\frac{R_{c1}}{2f})^2} & \text{--- (1-17)} \\ 1 - \frac{d_2}{f} = \frac{1 - \frac{d_1}{f}}{(1 - \frac{d_1}{f})^2 + (\frac{R_{c1}}{2f})^2} & \text{--- (1-18)} \end{cases}$$

又，

$$\begin{cases} W_1 = \frac{2\lambda}{\pi Q_1} & (\lambda \text{ 为波长}) \\ W_2 = \frac{2\lambda}{\pi Q_2} & \text{--- (1-19)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_1 = 1.5958 \sqrt{\frac{\lambda}{R_{c1}}} \\ Q_2 = 1.5958 \sqrt{\frac{\lambda}{R_{c2}}} \end{cases} \text{--- (1-20)}$$

适当： $d_1 = f$ 时：

$$(R_{c2})_{\max} = \frac{4f^2}{R_{c1}} \text{--- (1-21)}$$

此时 Q_2 最小， W_2 最大。

这样我们就可以根据光束 1 的共焦参量 R_{c1} 和距离 d_1 及所带的光束 2 的共焦参量 R_{c2} 来决定变换透镜焦距 f 及光束 2 腰部距透镜的距离 d_2 。此外还可以利用下式进行变换：

$$\begin{cases} \frac{d_1 - f}{d_2 - f} = \frac{w_{01}^2}{w_{02}^2} \\ (d_1 - f)(d_2 - f) = f^2 - f_0^2 \end{cases} \text{--- (1-22)}$$

f_0 为变换透镜的最短焦距， $f_0 = \pi w_{01} w_{02} / \lambda$

三、激光束结构参数的测定实验

由于谐振腔结构的不同，光束腰部可以位于腔内或腔外。位于腔外的测定比较方便。测定激光束结构参数的方法有直接测量法和干涉测量法。其中发散角的测定将在第七章另行叙述。

1. 光腰位于腔外时的直接测量法

测定原理示意图见图5。

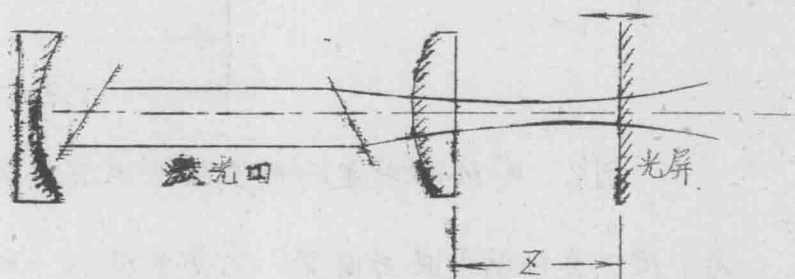


图5 光腰位于腔外时的直接测量法

用光屏沿光路上移动，从光屏上观测光斑的大小，记录下光斑大小与距离 z 的关系，得到曲线如图6。曲线极小值即对应光腰所在位置 z_0 及光腰直径 $2w_0$ 。

光屏可根据需要改换为变像管或照相机。由于光腰只位于激光腔一侧，所以有时需要在激光腔两侧进行测定后方可获得结果。测定 w_0 及其位置后即可根据公式(1-2)及(1-3)求出任意距离处的

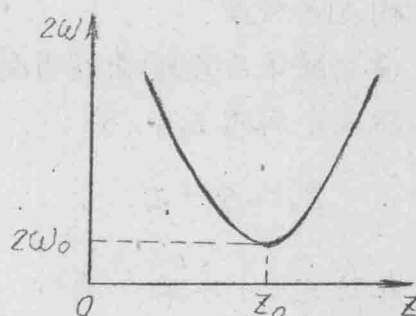


图6 光斑大小与光屏距离的关系曲线

光束波面曲率半径 R 及光束直径 2ω 。

这种方法要求激光束的输出比较稳定。

2. 圆环哈特曼网格直接测定法

实验装置示于图 7。

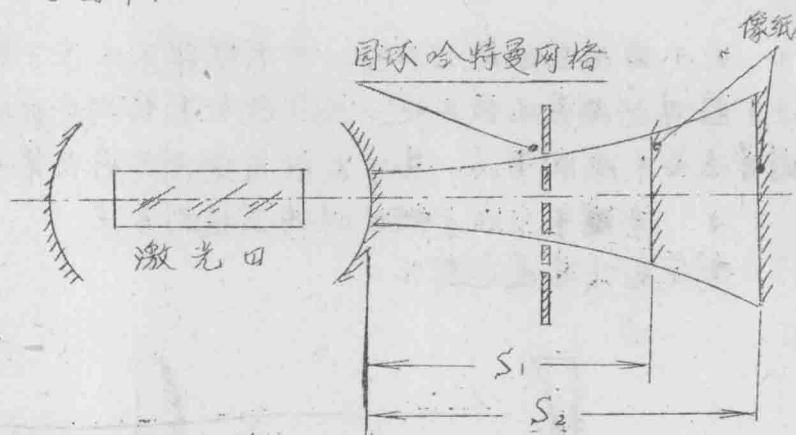


图 7 圆环哈特曼网格直接测波面的实验装置。

为了便于直接测定波面曲率，光路中放入一圆环哈特曼网格板。它是由许多小孔分佈在一系列不同直径的圆上，构成圆环状分佈的网格。每圆环上两相邻小孔之间的距离是相等的，每个小孔的直径也是相等的。在距输出腔片 S_1 及 S_2 处分别得到两个网格状场图，根据场图上网格分佈情况测出相应的光束平均直径 $2\omega_1$ 及 $2\omega_2$ 。当网格板的圆环间距足够小，就可以得到足够的测量精度。

设光腰平面距输出腔片的距离为 t ，那么 ω_1 及 ω_2 处距光腰平面的距离分别为 Z_1 、 Z_2 ：

$$Z_1 = S_1 + t ; \quad Z_2 = S_2 + t$$

由公式 (1-2) 有：

$$\omega_1^2 = \omega_0^2 \left\{ 1 + \left[\frac{\lambda (S_1 + t)}{\pi \omega_0^2} \right]^2 \right\} \quad \text{--- (1-23)}$$

$$\omega_2^2 = \omega_0^2 \left\{ 1 + \left[\frac{\lambda(S_2 + t)}{\pi \omega_0^2} \right]^2 \right\} \text{-----} (1-24)$$

由(1-23)(1-24)两式可求得 ω_0 及 t 。

又由(1-2)式可知在 ω_1 及 ω_2 处的波面曲率半径 R_1 及 R_2 分别为:

$$R_1 = (S_1 + t) \left\{ 1 + \left[\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda(S_1 + t)} \right]^2 \right\} \text{-----} (1-25)$$

$$R_2 = (S_2 + t) \left\{ 1 + \left[\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda(S_2 + t)} \right]^2 \right\} \text{-----} (1-26)$$

还可以作比较近似的处理。当接收到的两网格状场图之间的距离不太大时,可近似认为该两波面的曲率中心处于同一位置。此时只要测出两网格状场图上任一相对应的圆环直径 φ_1 及 φ_2 ,就可得到波面曲率半径 R_1 与 R_2 :

$$R_1 = \frac{\varphi_1 h}{\varphi_2 - \varphi_1} \quad (h \text{ 为两个场图之间的距离})$$

$$R_2 = R_1 + h$$

3. 干涉测光法

这是利用光束波面干涉的方法来确定波面的曲率半径。可采用迈克尔逊干涉仪或半块平板横向剪切干涉仪来获得激光束的波面干涉,再分别利用有关公式求出波面曲率半径。

(1) 迈克尔逊干涉仪测波面

由公式(1-2)(1-3)可知,当知道某距离 Z 处的波面曲率半径 R 及光束半径 ω 即可求得 ω_0 及 Z 为:

$$\omega_0^2 = \omega^2 / \left[1 + \left(\frac{\pi \omega_0^2}{\lambda R} \right)^2 \right] \text{-----} (1-27)$$

$$Z = R / \left[1 + \left(\frac{\lambda R}{\pi \omega^2} \right)^2 \right] \text{-----} (1-28)$$